

# **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES PILAR-PILAR EM TORRES TRELIÇADAS EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO PARA SUPORTE DE GERADORES EÓLICOS**

**David Martins<sup>1</sup>, Sueli Souza<sup>2</sup>, Válter Lúcio<sup>3</sup>, Carlos Chastre<sup>4</sup>, Luiz Souza<sup>5</sup>**

## **RESUMO**

Com o crescente consumo de energia elétrica são cada vez mais os países que procuram fontes de energia renovável e limpa, entre elas a eólica. A quantidade de energia produzida é influenciada pela altura das torres, dimensões das pás e potência dos aerogeradores. Quanto maior for a elevação da turbina maiores são a velocidade e estabilidade dos ventos alcançados. A solução de torre treliçada em concreto armado pré-moldado idealizada por Lúcio e Chastre [2] permite a construção de torres altas e é competitiva em relação aos outros sistemas estruturais.

As ligações têm uma importância fundamental no comportamento global das estruturas pré-moldadas. A viabilidade da ligação (fácil execução, baixo custo, comportamento/capacidade resistente) é preponderante na viabilização da construção destas torres.

Até à data foram estudadas quatro ligações (S1, S2, S3 e S4), sendo neste artigo abordadas apenas as ligações do modelo S3 com junta de 3mm (barras salientes/bainhas corrugadas/selagem com *grout*) e do modelo S4 com junta de 50 mm (ligações aparafusadas produzidas comercialmente).

Através dos resultados experimentais pode-se concluir que o mecanismo de rutura foi o mesmo nos dois modelos e que as soluções estudadas preenchem os requisitos para a sua utilização em estruturas pré-moldadas de concreto armado para suporte de aerogeradores.

**Palavras-chave:** Estruturas pré-moldadas de concreto armado; Ligações pilar-pilar; Torres para suporte de geradores eólicos.

## **1. INTRODUÇÃO**

O consumo crescente de energia elétrica cria necessidade de aumento da produção. Tendo em vista essa necessidade e as questões ambientais, muitos países procuram utilizar fontes de energia renovável e limpa, dentre elas a energia eólica. De acordo com as estatísticas do mercado global de vento do Conselho Global de Energia Eólica [1], 51 473 MW de nova capacidade de geração eólica foram adicionados em 2014.

A evolução das dimensões (altura da torre e comprimento das pás) e da potência dos aerogeradores contribuem para o aumento da produção de energia. O aumento da altura da torre eleva a turbina para alcançar velocidades maiores dos ventos. A solução de torre treliçada de concreto armado pré-moldado

---

<sup>1</sup> Aluno de Mestrado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, Concremat - Préfabricação e Obras Gerais, SA.; Portugal. [dmartins@concremat.pt](mailto:dmartins@concremat.pt)

<sup>2</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina; Brazil. [suelisouza@utfpr.edu.br](mailto:suelisouza@utfpr.edu.br)

<sup>3</sup> CERIS, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa; Portugal. [vjgl@fct.unl.pt](mailto:vjgl@fct.unl.pt)

<sup>4</sup> CERIS, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa; Portugal. [chastre@fct.unl.pt](mailto:chastre@fct.unl.pt)

<sup>5</sup> Centro de Tecnologia e Urbanismo - Universidade Estadual de Londrina; Brazil. [lasouza@uel.br](mailto:lasouza@uel.br)

idealizada por Lúcio e Chastre [2] permite a construção de torres altas e é competitiva em relação aos outros sistemas estruturais.

As ligações têm importância fundamental no comportamento global das estruturas pré-moldadas, por isso o estudo do comportamento das ligações entre os elementos da torre é de extrema importância. Segundo El Debs [3], as ligações devem ter o mesmo controle de qualidade que os elementos pré-moldados.

De acordo com os resultados dos ensaios experimentais de Reguengo et al. [4], o uso de bainhas de protensão num elemento e de barras salientes no outro, é uma boa solução para executar ligações entre elementos pré-moldados. O comprimento de ancoragem da barra saliente deve ser calculado de acordo com as normas vigentes. De acordo com Miltenberger [5], a rutura destas ligações pode ocorrer pelo escoamento do aço, na ligação entre o aço e o *grout* e entre o *grout* e o concreto. Os dois primeiros tipos de rutura descritos por Miltenberger, foram observados na série AS (ensaio com bainhas) realizados por de J.H. Ling et al. [6] e Popa et al. [7], que ensaiaram dois modelos de referência e quatro modelos pré-moldados com barras grauteadas. A análise dos resultados mostrou que os modelos pré-moldados com barras grauteadas tiveram comportamentos semelhantes aos de referência.

Faga et al. [8] estudaram três modelos de colunas com ligações aparafusadas sujeitos a uma carga axial de compressão (modelo 1 = 200 kN, modelo 2 = 600 kN e modelo 3 = 400 kN) e a vários deslocamentos horizontais:  $\pm 8,6$  mm,  $\pm 17,2$  mm,  $\pm 25,8$  mm,  $\pm 51,60$  mm,  $\pm 77,40$  mm e  $\pm 103,20$  mm. Através dos resultados pode-se concluir que: o comportamento das ligações parafusadas define os mecanismos de rutura, sem qualquer dano significativo, independentemente do nível de carga axial imposta na coluna; ocorreu somente escoamento dos parafusos de ancoragem que posteriormente atingiram o regime plástico; e nota-se fragmentação dos *grouts* em todos os ensaios. Houve também perda da rigidez da ligação devido às forças horizontais.

Até à data foram estudadas quatro ligações (S1, S2, S3 e S4), sendo neste artigo abordadas apenas as ligações do modelo S3 com junta de 3 mm (barras salientes/bainhas corrugadas/selagem com *grout*) e do modelo S4 com junta de 50 mm (ligações aparafusadas produzidas comercialmente). Através dos resultados experimentais pode-se concluir que o mecanismo de rutura foi o mesmo nos dois modelos e que as soluções estudadas preenchem os requisitos para a sua utilização em estruturas pré-moldadas de concreto armado para suporte de aerogeradores.

## 2. TORRE EÓLICA TRELIÇADA

A Figura 1 mostra a torre treliçada desenvolvida por Chastre e Lúcio [9], composta por elementos pré-moldados que constituem uma treliça espacial, para o uso em torres acima dos 80 m de altura. Esta solução estrutural suporta geradores de grande potência *onshore* e *offshore*, proporciona liberdade na escolha da geometria da torre, permite a otimização da capacidade resistente e o controle da frequência natural de vibração, reduz os custos da fundação e os ruídos por causa do amortecimento do concreto. Em 2009 esta solução ganhou o prêmio *BES inovação* na categoria “Novos materiais e tecnologias industriais”, em Portugal.

## 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 3.1 Descrição dos modelos experimentais

A ligação pilar-pilar S3 foi assegurada por 12 barras longitudinais salientes do elemento B (Figura 2), introduzidas em 12 bainhas previamente betonadas no elemento A. Na ligação S4 utilizaram-se 6 ligações aparafusadas (macho-fêmea). As juntas consideradas nos modelos de ligação S3 e S4 foram de 3 mm e 50 mm, respectivamente. Os pilares foram sujeitos aos esforços de compressão excêntrica, isto é, flexão composta com esforço axial (Figura 3).

Os modelos foram executados à escala 1:2, tomando como base as dimensões da torre treliçada da Figura 1. Cada modelo/pilar (S3 e S4) resultou da ligação entre dois elementos (A e B) com dimensões

idênticas (3,125m), ver Figura 2. O corte A-A' mostra o consolo que proporcionou o apoio de cada elemento e a aplicação da protensão. O corte B-B' mostra a seção transversal circular dos elementos A e B e a parte superior concebida para aplicação do carregamento vertical durante o ensaio.



Figura 1. Torre treliçada pré-moldada em concreto armado para *onshore* (à esquerda) e *offshore* (à direita). [9].

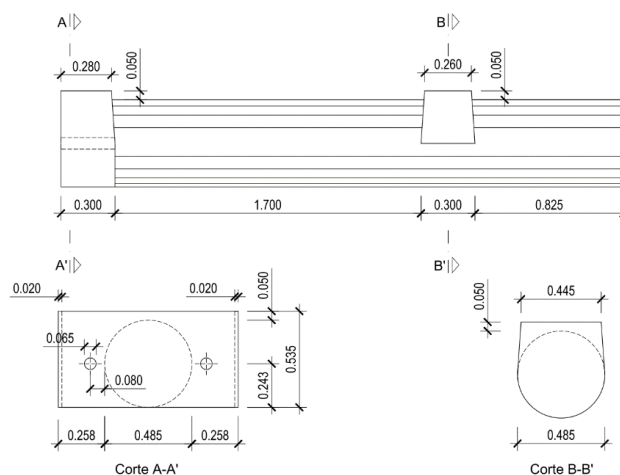


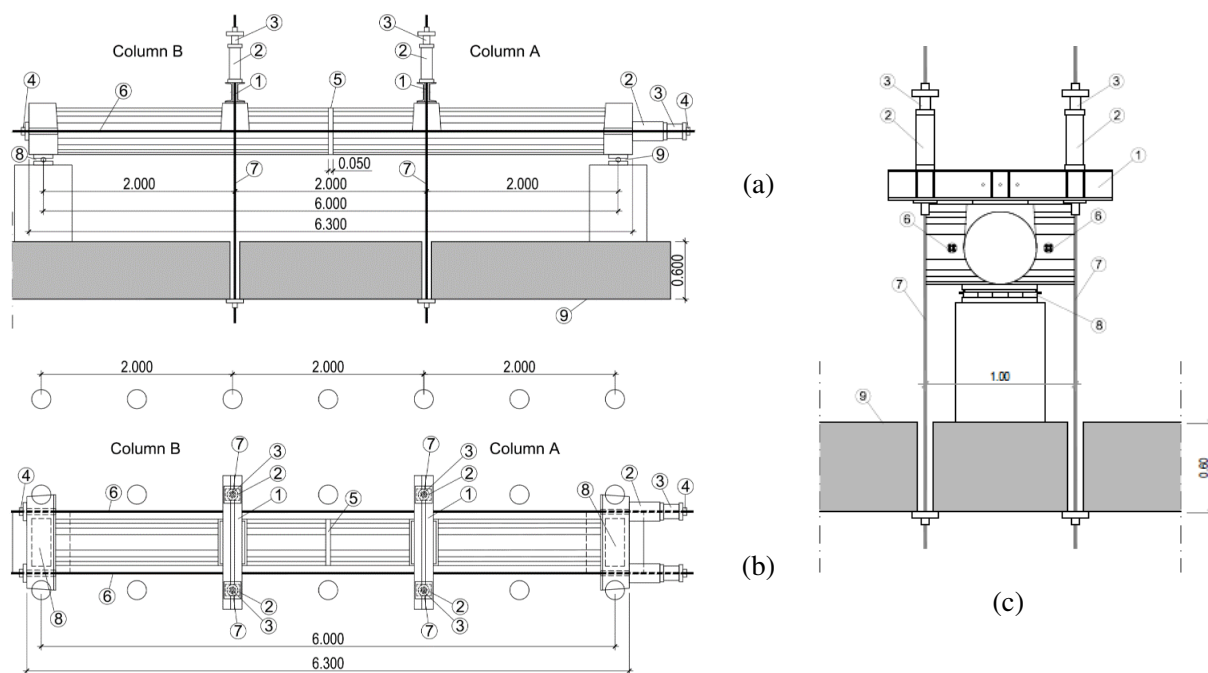
Figura 2. Geometria dos elementos A e B

### 3.2 Esquema de ensaio

De acordo com o esquema do ensaio da Figura 3, o comprimento final do pilar com junta de 50 mm foi de 6,30 m. Para o ensaio do pilar com junta de 3mm, o comprimento final foi reduzido para 6,253 m. Os pilares foram ensaiados na posição horizontal.

Após a aplicação de uma protensão no pilar, que se manteve constante durante todo o ensaio ( $1000 \text{ kN} \leftrightarrow \sigma_c = 5 \text{ MPa}$ ), foi aplicado um carregamento transversal cíclico (Figura 4). Para o carregamento transversal foram utilizados 4 macacos hidráulicos e 4 células de carga, com capacidades de 200 kN e 500 kN, respetivamente. Na aplicação da protensão, foram utilizados 2 macacos hidráulicos e 2 células de carga, com capacidades de 1000 kN e 2000 kN, respetivamente. O sistema de carga transversal transmite a carga em quatro pontos, de forma simétrica em relação ao eixo do pilar (Figura 3). Para aquisição dos dados, foi utilizado um *Data logger* UPM100 da HBM com capacidade para 60 canais e o *software* Catman 4.0 da HBM.

Para medição dos deslocamentos verticais foram utilizados sete transdutores de deslocamento de fio, instalados na direção longitudinal dos modelos, cuja localização pode ser vista na Figura 5. As medições ocorreram: por baixo das duas cargas verticais (transdutores D2 e D5); a 1 metro de cada apoio (transdutores D1 e D6); a 0,25 m de cada lado do meio do vão (transdutores D3 e D4); e no meio do vão (transdutor D7). As aberturas das fissuras foram medidas com o instrumento Omega e marcadas com giz de cera. A leitura com esse instrumento ocorre diretamente pelo sistema de aquisição de dados. Os locais de medição estão localizados no meio do vão, na altura da junta, como mostra a Figura 5.



**Legenda:** 1 – Perfil metálico; 2 – Macaco hidráulico; 3 – Célula de carga (CC.); 4 – Cabeças de ancoragem; 5 – Junta de ligação com 50 mm espessura; 6 – Cordões de pré-esforço; 7 – Varões de aço; 8 – Apoio simples deslizante; 9 – Laje do piso do laboratório com 0,60 m de espessura; Figura 3. Esquema de ensaio: Vista lateral (a); Planta (b); Corte transversal (c)

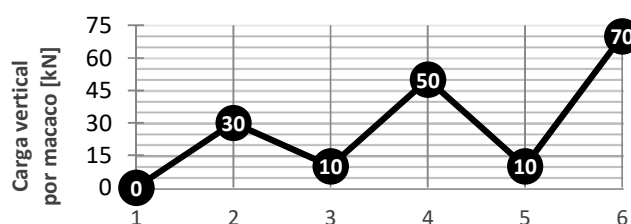


Figura 4. Sequência do carregamento transversal aplicado em cada macaco durante os ensaios.

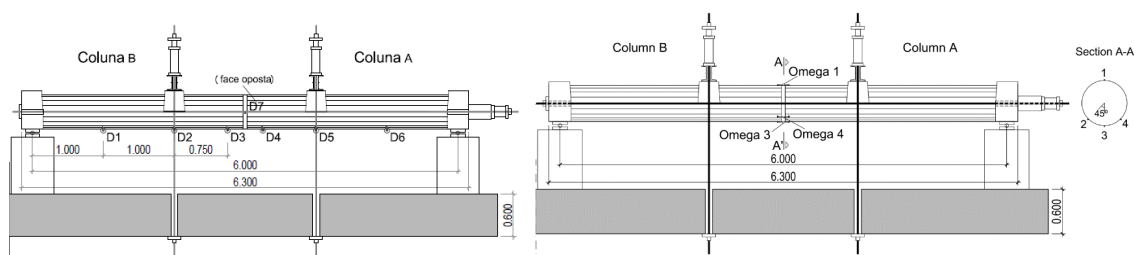


Figura 5. Posição dos defletómetros (à esquerda); Posição dos Ômegas (à direita);

### 3.3 Materiais

As Tabelas 1, 2 e 3 mostram as características mecânicas médias do concreto, grout e calda com fibra dos modelos S3 e S4. A Tabela 4 mostra a característica da resina utilizada para preencher a junta de 3mm. Foram utilizados varões nervurados de aço A500 NR SD e ligações comerciais parafusadas com tensões de escoamento mostradas na Tabela 5.

Tabela 1. Características mecânicas médias do concreto

Modelo	Elemento	$f_{cm,sp}$ [MPa]	$f_{cm,cube}$ [MPa]	$f_{cm}$ [MPa]	$E_{cm}$ [GPa]
S3	A	3,6	50	49,4	35,5
	B	3,8	46	-	-
S4	A	4,3	49,1	-	-
	B	4,2	58	52,4	39,5

Tabela 2. Tensões resistentes do grout utilizado no preenchimento das bainhas do modelo S3

Provete	Idade (dias)	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ctm,fl}$ [MPa]
Grout	47	66,1	8,9

Tabela 3. Tensões resistentes da calda com fibra utilizada para preenchimento da junta e negativos da ligação aparafusada do modelo S4

Provete	Idade (dias)	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ctm,fl}$ [MPa]
Calda com fibra	25	84,4	8,5

Tabela 4. Tensões resistentes da resina utilizada no preenchimento da junta de 3 mm do modelo S3 (valores da ficha técnica do produto)

Resina	Idade (dias)	Temperatura (°C)	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ctm,fl}$ [MPa]
Sikadur-52 Injection	7	+23	Aprox. 52	Aprox. 61

Tabela 5. Tensões de escoamento média dos aços da armadura longitudinal e da ligação.

Barra	Ligação		Armadura	
Diâmetro [mm]	12.5	16	10	16
$f_{ym}$ [MPa]	565.3	560.7	550,3	546,3

### 3.4 Armaduras

Na Figura 6 pode-se observar a cintagem da armadura longitudinal considerada na seção transversal circular nos elementos A e B do modelo S3. No modelo S4, a cintagem do elemento A foi também executada conforme a Figura 6. Na cintagem do elemento B, devido à presença dos negativos na zona de ligação, só foi possível considerar 7 cintas Ø10//0.05. As cintas de 6mm de diâmetro (armadura meramente construtiva) serviram para posicionar a armadura longitudinal da ligação fêmea (Figuras 8 e 9).

As Figuras 10 a 13 ilustram as armaduras longitudinais dos elementos A e B dos modelos.

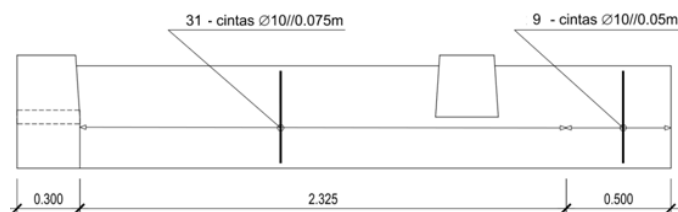


Figura 6. Armadura transversal dimensionada para os elementos A e B do modelo S3 e elemento A do modelo S4.



Figura 7. Modelos S3 - Detalhes das armaduras dos elementos A (à esquerda) e B (à direita)

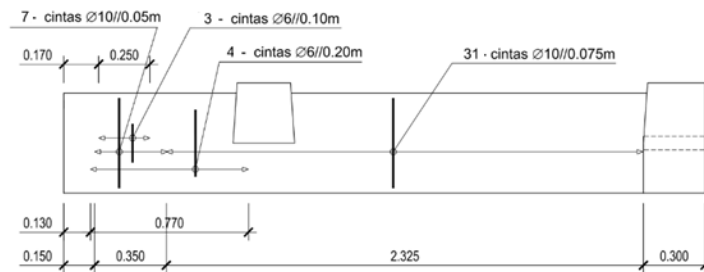


Figura 8. Armadura transversal dimensionada para o elemento B do modelo S4 com ligações parafusadas.



(a) Elemento A

(b) Elemento B

Figura 9. Modelos S4 - Detalhes das armaduras dos elementos A (à esquerda) e B (à direita)

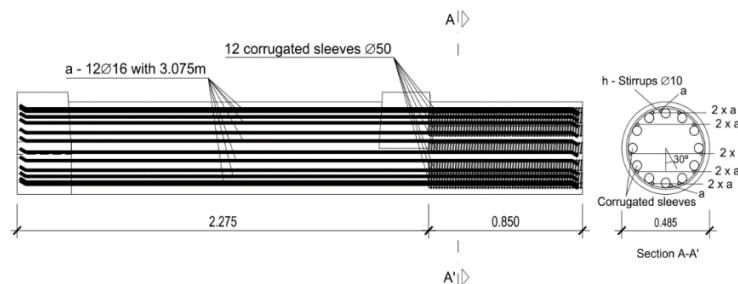


Figura 10. Armadura longitudinal do elemento A do modelo com ligações de barras salientes (modelo S3).



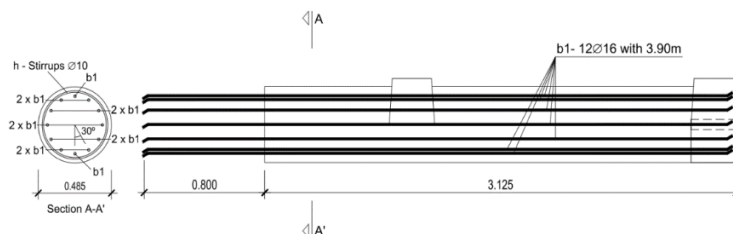


Figura 11. Armadura longitudinal do elemento B do modelo com ligações de barras salientes (modelo S3).

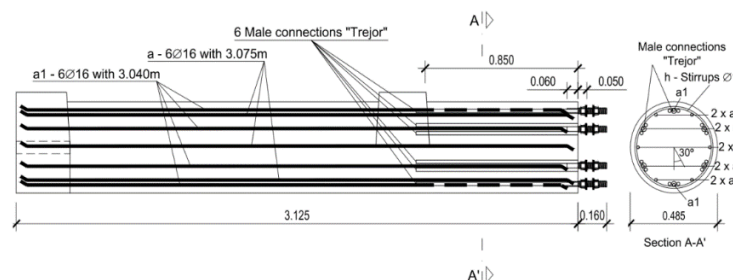
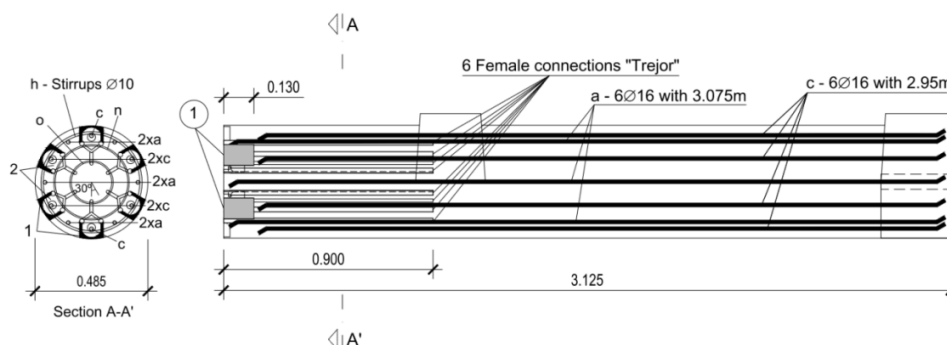


Figura 12. Armadura longitudinal do elemento A do modelo com ligações aparafusadas (modelo S4).



**Legenda:** 1-negativos; n- cintas Ø6//0.20; o- cintas Ø6//0.10.

Figura 13. Armadura longitudinal do elemento B do modelo com ligações aparafusadas (modelo S4).

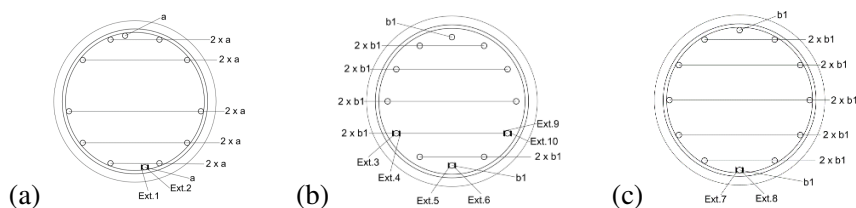
### 3.5 Instrumentação

No modelo S3, para medir as deformações das armaduras longitudinais, foram aplicados na coluna A, extensómetros no varão mais solicitado na zona de baixo da carga (1,025 m da face da junta). Na coluna B foram aplicados a 0,15 m da face da junta (armadura de ligação) e a 1,025 m da face junta (armaduras ordinárias). No modelo S4, para medir as deformações das armaduras longitudinais, foram aplicados na coluna A, extensómetros a 0,15 m da face da junta (armadura de ligação) e a 1,025 m da face junta (armaduras ordinárias). Na coluna B foram aplicados a 0,15 m da face da junta (armadura de ligação), e a 0,325 m e 1,025 m da face junta (armaduras ordinárias).

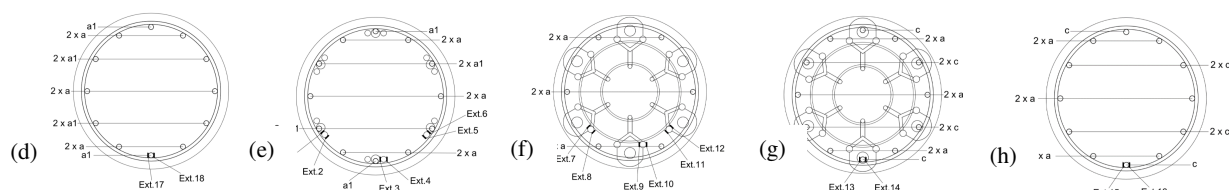
## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Resultados dos ensaios

A disposição das células de carga no sistema de ensaio encontram-se na figura 16. As células de carga CC1 e CC2 registraram o valor da força longitudinal e as células CC3 a CC6 os valores das cargas transversais. Os valores registrados na rutura dos modelos S3 e S4 são mostrados no Tabela 6.



**Legenda:** (a)-Coluna A: instrumentação da armadura na zona por baixo da carga (1,025 m da face da junta); (b)-Coluna B: instrumentação da armadura de ligação a 0,15 m da face da junta; (c)-Coluna B: instrumentação da armadura ordinária na zona por baixo da carga (1,025 m da face da junta);  
Figura 14. Localização dos extensômetros utilizados na coluna A e B (modelo S3)



**Legenda:** (d)-Coluna A: instrumentação armadura ordinária na zona debaixo da carga (1,025 m da face da junta); (e)-Coluna A: instrumentação da armadura de ligação a 0,15 m da face da junta; (f)-Coluna B: instrumentação da armadura de ligação a 0,15 m da face da junta; (g)-Coluna B: instrumentação da armadura ordinária a 0,325 m da face da junta; (h)-Coluna B: instrumentação armadura ordinária na zona debaixo da carga (1,025 m da face da junta);  
Figura 15. Localização dos extensômetros utilizados na coluna A e B (modelo S4)

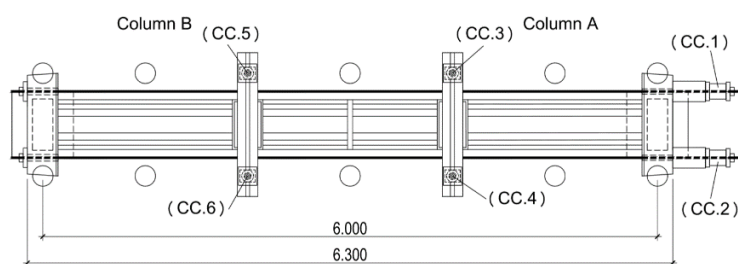


Figura 16. Vista em planta da disposição das células de carga.

Tabela 6. Valores registrados nas células de carga na rutura dos modelos.

Modelo	Células					
	CC1 (kN)	CC2 (kN)	CC3(kN)	CC4 (kN)	CC5 (kN)	CC6 (kN)
S3	509,0	521,6	67,1	68,5	66,06	65,05
S4	536,6	513,5	69,6	68,3	68,8	68,6

As Figuras 17 e 18 mostram a flecha nos modelos S3 e S4 em função do carregamento transversal aplicado em cada macaco. As posições dos defletómetros podem ser vistas na Figura 5.

#### 4.2 Análise dos resultados

A ruptura dos dois modelos ocorreu por flexão a meio vão (região de máximo momento fletor), com esmagamento da zona comprimida (Figuras 19 e 20).

Na região de máximo momento do modelo S3, verificou-se maior fissuração no elemento B. Tal era expectável pois, devido à existência das bainhas com 0.90 m de comprimento, a taxa de armadura do elemento A (24 barras de 16 mm) foi superior à do elemento B (12 barras de 16 mm). No modelo S4 as



armaduras foram iguais nos dois elementos. A falta de resina na parte superior do modelo S3 (Figura 19) diminuiu a altura da zona comprimida, conduzindo a um aumento da flecha a meio vão e consequentemente ao aumento do momento devido a carga axial aplicada (protensão dos cordões). As fibras incorporadas na calda evitaram a fragmentação do material na junta e na zona da ligação aparafusada, melhorando desta forma o aspeto da fissuração do modelo S4. Contudo, na fase de rutura, verificou-se esmagamento do concreto na região dos furos preenchidos com a calda bem como a encurvadura da barra da ligação aparafusada (Figura 20). Este problema pode ser resolvido confinando a armadura, isto é, inserido cintas nesta região.

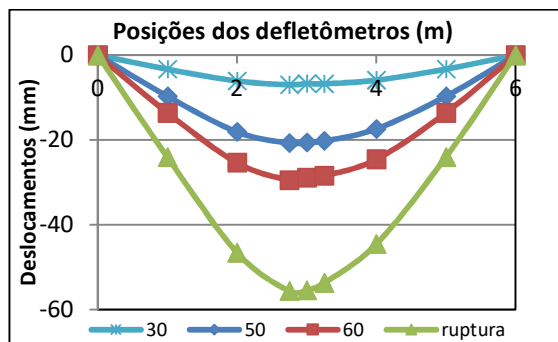


Figura 17. Deformada do modelo S3 em função da carga transversal

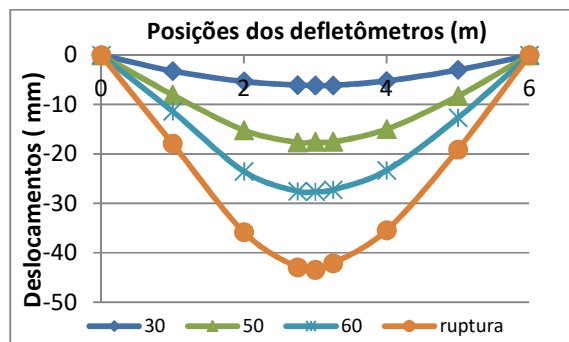


Figura 18. Deformada do modelo S4 em função da carga transversal

O maior deslocamento vertical registado na rutura (Figuras 17 e 18) ocorreu a meio vão (posição D7) com valores de 55,5 mm para o modelo S3 e 43,5 mm para o modelo S4. Conclui-se que a rutura em ambos os modelos ocorreu a meio-vão e que a rigidez do modelo com ligação aparafusada é superior. Observando a Tabela 6, nenhuma célula de carga alcançou os 70 kN previsto no programa de ensaio. Os valores da carga aplicada no modelo S4 foram ligeiramente superiores comparativamente com o modelo S3. O momento máximo actuante final obtido no modelo S3 foi de 345 kN.m ( $M_{final} = M_{p.p+sc} + M_{2^{a} ordem}$ ) enquanto para o modelo S4 foi de 341,8 kN.m.



Figura 19. Aspeto do modelo S3 na rutura.

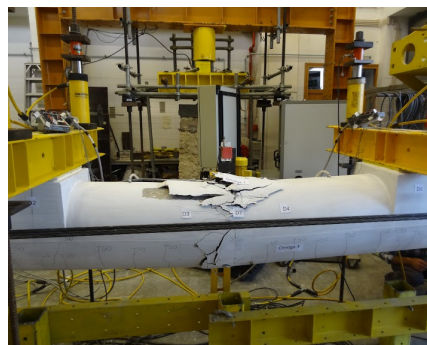


Fig. 20. Aspeto do modelo S4 na rutura.

## **5. CONCLUSÕES**

De acordo com os resultados obtidos a utilização deste tipo de ligações é perfeitamente admissível e segura. Nas ligações aparafusadas deve-se ter especial cuidado com a cintagem na região próxima da junta de forma a evitar fenómenos de flambagem. Nas ligações com bainhas deve-se ter cuidado com o grout, a injeção da resina e com o comprimento da bainha.

## **AGRADECIMENTOS**

O trabalho experimental foi realizado com o apoio da empresa CONCREMAT - Prefabricação e Obras Gerais S.A. (Portugal) que forneceu os modelos, da empresa A. R. TREJOR Comercial Ltda. (Brasil) que doou as ligações aparafusadas TEP 27; e da VSL Portugal pela doação dos cordões de protensão e outros acessórios relacionados. Os autores agradecem também à SIKA, MAPEI e SECIL, que cederam o superplastificante, a sílica e o cimento para produção da calda para a ligação do modelo S3, e à empresa SOPROEL - Sociedade de Projectos, Obras e Estudos, S.A. pelo fornecimento da resina e disponibilização de dois funcionários para injeção da mesma na ligação do modelo S4.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Global Wind Energy Council. (2014). Global Statistics. Fonte: GWEC. Representing The Global Wind Energy Industry: [www.gwec.net](http://www.gwec.net).
- [2] Lúcio, V.; Chastre, C.; Precast concrete wind tower structures-historic evolution, current development and future potential; CPI - Concrete Plant International; June 2014.  
<http://www.cpi-worldwide.com/flips/2014/3>
- [3] El Debs, M.; Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações; Editora: Oficina de Textos, São Paulo, Brasil. 2ª edição, 2017; ISBN: 978-85-7975-279-7
- [4] Reguengo, R.; Lúcio, V.; Chastre, C.; Ligação pilar – fundação com armaduras salientes do pilar, em estruturas pré-fabricadas – Ensaios monotónicos e ensaios cíclicos; BE2008 – Encontro Nacional de Betão Estrutural 2008; Guimarães, Novembro de 2008
- [5] Miltenberger, P.; Capacity design of grouted anchors; 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology; Washington, DC, USA, 2001.
- [6] Popa, V.; Papurcu, A.; Cotofana, D.; Pascu, R.; Experimental testing on emulative connections for precast columns using grouted corrugated steel sleeves. Bulletin of Earthquake Engineering, August 2015, Volume 13, Issue 8, pp 2429-2447; DOI 10.1007/s10518-014-9715-9.
- [7] Jen Hua Ling, J.; Rahman, A.; Ibrahim, I.; Feasibility study of grouted splice connector under tensile load; Construction and Building Materials, Volume 50, 15 January 2014, Pages 530–539; doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.010
- [8] Faga, E.; Lorenzo, B.; Davide, B.; Nascimbene, R.; Comparison between numerical and experimental cyclic response of alternative column to foundation connections of reinforced concrete precast structures; Proceedings of the Third International fib Congress and PCI Annual Convention and Bridge Conference; Washington, DC, USA, June 2010; ISBN: 9781617828218
- [9] Estruturas Pré-moldadas no Mundo - Aplicações e Comportamento Estrutural; Edição FFCT - UNL, Impresso na Editora Parma Lda, S. Paulo, Brasil, 2012, ISBN: 978-989-97721-1-3.